

声学法测量复合绝缘子弹性常数

Determination of Elastic Constants in Composite Insulator from Ultrasonic Method

陆铭慧, 杨 奕, 陈以方, 付德永
(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

LU Ming-hui, YANG Yi, CHEN Yi-fang, FU De-yong
(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 提出了一种实用的声学法测量复合材料弹性常数的方法。依据复合材料中声波速度与材料弹性常数之间的本构关系, 测量不同传播方向的少数几个声速, 就可以得到其弹性常数矩阵。以复合绝缘子为测量样品, 为提高测量横波的精度, 根据超声波在边界上的波型转换条件, 使用常规纵波探头对由掠入射纵波产生的横波进行测量。

关键词: 复合材料; 弹性常数矩阵; 声学法测量

中图分类号: O429; TB302.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)11-0046-04

Abstract: A test method of velocity measurement for elastic constants of composite material is proposed. Based on the relationship between elastic constants and sound velocities in composite material and measuring very few velocities of different propagation direction, the elastic constant matrix can be calculated out. Taking the composite insulator as a measurement sample, knowing the waveform conversion condition on the boundary, only a conventional longitudinal testing probe is needed to measurement transverse wave produced by grazing incidence longitudinal wave.

Key words: composite material; elastic constant matrix; velocity measurement

复合材料是由两种或多种材料组成的材料, 由于有优异的比刚度、比强度性能, 在工业、国防以及其他领域发挥越来越重要的作用。如广泛应用于电力系统的高压电输电线路上的合成绝缘子, 具有优良的电气和力学性能, 以及体积小、重量轻、抗老化性能好等优点。合成绝缘子是采用有机高分子绝缘材料制造的新型复合结构绝缘子, 由芯棒伞裙护套、联接金具及附件等组成。芯棒是由树脂粘接上百万根玻璃纤维沿轴线平行排列而形成的玻璃钢棒, 抗拉强度高, 具有良好的抗挠和抗疲劳性, 主要承受合成绝缘子的机械负载^[1-2]。

对于测定复合材料(如图1的层合结构)的弹性常数而言, 利用常规的机械性质测试方法来测定是极其困难的, 而利用声速法测定却较为容易。美国等发达国家对利用超声波测定复合材料弹性常数的研究非常重视, 已经研究出多种测试方法。用声速法测定弹性常数的基本原理是根据表征声波的速度与介质弹性常数、介质密度以及介质质点振动之间关系的 christoffel 方程式, 在测定了声波的传播方向和速度后, 就可以计算出介质的弹性常数^[3-5]。

利用声速法测量复合材料的弹性常数, 有两个问

题需要注意, 一是要保证速度测量的精度, 二是尽量简化求解弹性常数的计算。一般来讲, 对于纵波声速测量, 精度较高, 而对横波声速的测量, 通常会有较大的误差, 其原因是: 用横波直探头测量, 探头主频太低, 探头延迟量测量不准引起误差; 用斜探头测量, 声束有一定宽度, 接收信号对探头平移反应不灵敏, 也使得声速测量精度不高。本工作对掠入射纵波产生的横波进行测量, 保证了横波测量的精度。而对第二个问题, 由于复合材料一般属正交异性材料, 合成绝缘子是具有横向各向同性的典型各向异性材料, 在基本晶面内速度有解析表达式, 因而可以方便地计算弹性常数。

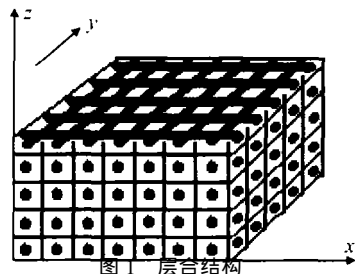


图1 层合结构

Fig. 1 Laminar structure

1 声速法测量弹性常数原理^[6]

对于一些纤维增强型层合板(如图 1),是由层状纤维织物增强基体构成的复合材料,各层的纤维方向是一致的。这种复合材料的结构特点是:在整体结构上是各向异性的, oxy 平面是弹性对称面, z 轴为 4 次对称轴,因此可以看成具四方晶系的对称性,非零的弹性常数为 12 个,其中独立的弹性常数是 6 个,弹性常数矩阵为

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据波的传播理论,得到 christoffel 方程的特征行列式为

$$\begin{vmatrix} l^2 c_{11} + m^2 c_{66} + n^2 c_{44} - \rho c^2 & lm(c_{66} + c_{12}) & nl(c_{13} + c_{44}) \\ lm(c_{66} + c_{12}) & l^2 c_{66} + m^2 c_{11} + n^2 c_{44} - \rho c^2 & mn(c_{13} + c_{44}) \\ nl(c_{13} + c_{44}) & mn(c_{13} + c_{44}) & (l^2 + m^2)c_{44} + n^2 c_{33} - \rho c^2 \end{vmatrix} \quad (2)$$

其中 l, m, n 是波矢量的方向余弦, ρ 为介质的密度。

令行列式(2)等于零,得出色散关系(特征方程)为

$$\Omega = \begin{vmatrix} l^2 c_{11} + m^2 c_{66} + n^2 c_{44} - \rho c^2 & lm(c_{66} + c_{12}) & nl(c_{13} + c_{44}) \\ lm(c_{66} + c_{12}) & l^2 c_{66} + m^2 c_{11} + n^2 c_{44} - \rho c^2 & mn(c_{13} + c_{44}) \\ nl(c_{13} + c_{44}) & mn(c_{13} + c_{44}) & (l^2 + m^2)c_{44} + n^2 c_{33} - \rho c^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

方程式(3)是 c 的三次方程,它的三个解对应于三个不同的波,即准纵波、准横波和纯横波。一般来讲,这个方程式只能用数值求解。对于复杂的各向异性介质,

要想反演出全部弹性常数,需要进行复杂的计算。为了简化计算,在反演弹性常数时,通常选择某些特殊传播方向。当波在 oxy 平面传播时,(3)式可简化为

$$\Omega = \begin{vmatrix} l^2 c_{11} + m^2 c_{66} - \rho c^2 & (c_{66} + c_{12})lm & 0 \\ (c_{66} + c_{12})lm & l^2 c_{66} + m^2 c_{11} - \rho c^2 & 0 \\ 0 & 0 & c_{44} - \rho c^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

令波的传播方向与 x 轴成 φ , 则有 $m = \sin \varphi, n = \cos \varphi$, 由此得出的色散方程(4)分解成一个线性因子 Ω_1 和一个二次因子 Ω_2 。由 $\Omega_1 = 0$ 得到纯横波的速度

$$c_1 = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}} \quad (5)$$

由 $\Omega_2 = 0$ 得到准纵波的速度

$$c_2 = \left(\frac{c_{11} + c_{66} + \sqrt{(c_{11} - c_{66})^2 \cos^2 2\varphi + (c_{12} + c_{66})^2 \sin^2 2\varphi}}{2\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\Omega = \begin{vmatrix} m^2 c_{66} + n^2 c_{44} - \rho c^2 & 0 & 0 \\ 0 & m^2 c_{11} + n^2 c_{44} - \rho c^2 & mn(c_{13} + c_{14}) \\ 0 & mn(c_{13} + c_{14}) & m^2 c_{44} + n^2 c_{33} - \rho c^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

令波的传播方向与 z 轴成 θ , 则有 $m = \sin \theta, n = \cos \theta$, 由此得出的色散方程(8)分解成一个线性因子 Ω_1 和一个二次因子 Ω_2 。由 $\Omega_1 = 0$ 得到纯横波的速度

$$c_5 = \frac{c_{66} \sin^2 \theta + c_{44} \cos^2 \theta}{\rho} \quad (9)$$

由 $\Omega_2 = 0$ 得到准纵波的速度

$$c_6 = \left(\frac{c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta + c_{44} - \sqrt{(c_{11} - c_{44}) \sin^2 \theta - (c_{33} - c_{44}) \cos^2 \theta + (c_{13} + c_{44})^2 \sin^2 2\theta}}{2\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

和准横波的速度

$$c_7 = \left(\frac{c_{11} \sin^2 \theta + c_{33} \cos^2 \theta + c_{44} - \sqrt{(c_{11} - c_{44}) \sin^2 \theta - (c_{33} - c_{44}) \cos^2 \theta + (c_{13} + c_{44})^2 \sin^2 2\theta}}{2\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$\theta = 0$ 时,即声波沿 z 轴方向传播,此时纵波速度为 $c_8 = \sqrt{c_{33}/\rho}$ 。

通过对沿不同方向传播的声波进行测量,就可以反演出合成绝缘子的 6 个弹性常数。由于 c_1 和 c_5 是

水平偏振的横波,测量有一定的困难,一般不测量,测量其他 6 个速度就可计算出 6 个独立的弹性常数。

如果构成层合板的各层纤维方向彼此相差 45° 或 60° ,这样顺次铺叠成的层合板,可以看成是横向各向

同性,其平均效果为在铺层平面 oxy 内的各个方向上具有相同的力学性能。此时可推得 $c_{66} = \frac{c_{11} - c_{12}}{2}$, 独立的弹性常数减为 5 个, 则有 $c_2 = c_4 = \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}}$, $c_3 = \sqrt{\frac{c_{66}}{\rho}}$ 。合成绝缘子即是横向各向同性的复合材料, z 方向为纤维方向, 把上百万的玻璃纤维堆积, 由基体树脂牢固地粘接起来, 形成单向增强玻璃钢棒。在速度测量时对 c_2, c_3, c_6, c_7 和 c_8 进行, 即可计算出 5 个弹性常数。

2 声速测量原理及实验样品

文献[7]提供的产生掠入射纵波和临界入射横波

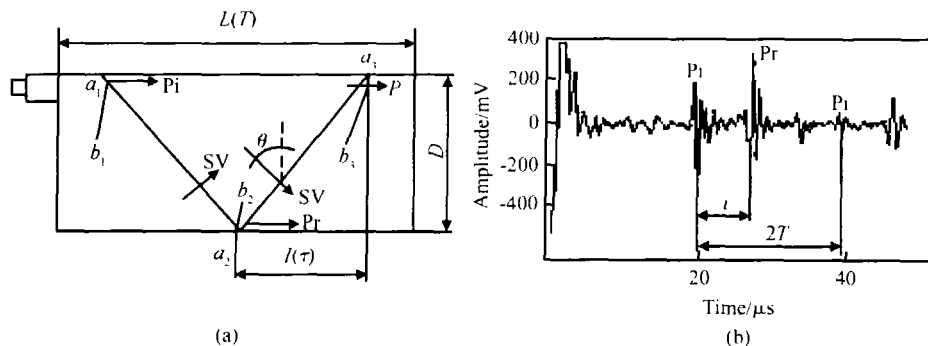


图2 板、棒中的超声波 (a) 传播方向; (b) 接收波形

Fig. 2 Ultrasonic in plate and cylinder (a) propagation direction; (b) received waveform

$$c_p = \frac{1}{t}, c_s = \frac{c_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{c_p \tau}{d}\right)^2}}, \theta = \arccos \frac{c_s}{c_p} \quad (12)$$

由于需要测量不同方向的五个声速, 制作了两个棒形样品和一个板形样品。如图 3 所示, 样品 1 为圆

形棒, z 轴是纤维方向; 样品 2 为方棒, 垂直纸面的轴为纤维方向, 在这个面内传播的波是各向同性的; 样品 3 为圆柱体中斜着切出来一块, ab, cd 为两个斜平面, 与纤维方向 z 的夹角为 θ 。

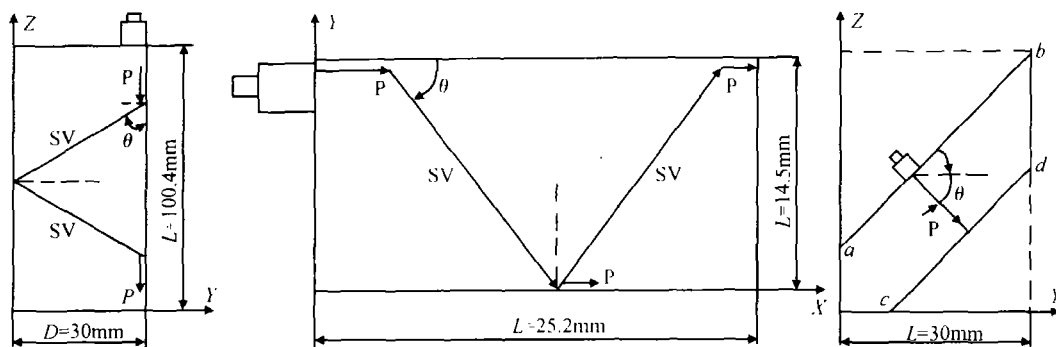


图3 测量样品 (a) 样品 1; (b) 样品 2; (c) 样品 3

Fig. 3 Measurement samples (a) sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

3 声速测量及弹性常数计算

实验样品是由清华大学电机系提供的, 测定的密度为 2130 kg/m^3 。采用 1 MHz 的纵波探头, 用样品 2 测得 $c_4 = 3430 \text{ m/s}$, $c_3 = 1975 \text{ m/s}$; 用样品 1 测得 $c_8 = 5280 \text{ m/s}$, $c_7 = 2420 \text{ m/s}$, $\theta = 62.68^\circ$; 用样品 3 测得 $c_6 =$

的方法, 图 2 为板、棒中声脉冲传播路径和波形。当探头靠近侧边时, 掠入射纵波 P_i 将产生侧面波(以临界角 θ 传播的横波) SV 。探头不靠近侧边时, 侧壁会有正常的波形转化。横波临界入射下侧壁时产生爬波 P_r , 沿着侧壁传播, 同掠入射纵波 P_i 相比, 迟到声程 l (SV 波传播的声程为 $l \sin \theta$), 延迟时间为 τ 。图中的弧线 $a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3$ 为纵波波阵面, 斜线 $a_1 a_2, a_3 a_3$ 为侧面波的波阵面。板或棒长为 L , 板的厚度或棒的直径为 D 。由于采用自发自收的测量方式, 纵波之间为两次端面反射的声程 $2T$, 侧面波 SV 相对纵波 P 有一个延时 τ 。可以计算得到纵波波速 C_p 、横波的波速 C_s , 以及横波传播方向和侧壁法线之间的夹角 θ [8]。

4270 m/s , $\theta = 45^\circ$ 。

通过 c_2, c_3 和 c_8 直接计算出 c_{11}, c_{66} 和 c_{33} , 并由 $c_{12} = c_{11} - 2c_{66}$ 给出 c_{12} 。 c_{13} 和 c_{44} 是通过把式(10)和(11)两个方程联立求得的^[9], 此时纵波的传播方向 $\theta_1 = 45^\circ$, 横波的传播方向 $\theta_2 = 62.68^\circ$ 。测得声速和计算的弹性常数列于表 1。

表 1 合成绝缘子中的声速和弹性常数
Tabel 1 Sound velocity and elastic constant

Measured value of sound	c_2	c_3	c_8	c_6	c_7
velocity/ $\times 10^3(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.43	1.97	5.28	4.27	2.4
Measured value elastic	c_{11}	c_{12}	c_{33}	c_{44}	c_{13}
constant/ $\times 10^{10}(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	2.51	0.85	5.94	0.91	1.09

4 合成绝缘子的声传播特性研究

确定了弹性常数矩阵,可以进一步研究声波在复合材料中的传播特性。由于复合材料是各向异性介质,声波速度与传播方向有关,不同方向的波传播速度是不同的,研究声波在复合材料中的传播特性即是研究声波速度与传播方向的关系,本工作主要研究晶面内相速度与传播方向的关系。由于合成绝缘子是具有横向各向同性的各向异性材料,在垂直于纤维方向 z 的 xy 平面内,波的速度与传播方向无关,是不变的。在 xz 或 yz 平面内传播的波是各向异性的,图4为 xz 平面内三个波的相速度图,图上反映出纵波有比较明

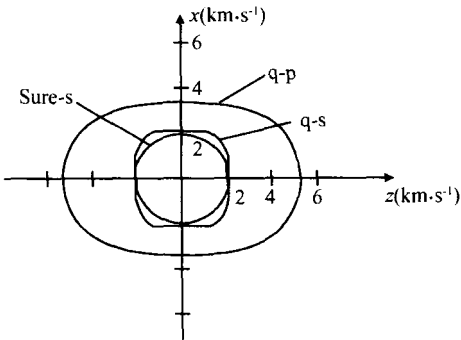


图 4 xz 平面内的相速度曲线
Fig. 4 Phase velocity curves in xz plane

显的各向异性。纵波的这个特点在复合材料的超声检测中应引起注意。

5 结束语

本工作给出了一种简单方便的测量复合材料弹性常数的声学法,主要特点是对由掠入射纵波产生的横波进行测量,可避免直接测量横波时所产生的误差大的问题。

参考文献

[1] 张福林. 复合绝缘子机械性能综述[J]. 电瓷避雷器,1998,(3):10-13.
[2] 吴亚光,蔡炜. 复合绝缘子的运行特性及可靠性分析[J]. 电瓷避雷器,2004,(1):3-9.
[3] ROKILIN S I, WANG W. Measurements of elastic constants of very thin anisotropic plates. [J] J Acoust Soc Am, 1993, 94 (5): 2712- 2721.
[4] 盛季生. 复合测量弹性常数测定的超声波技术[J]. 力学进展, 1996, 26(4): 541- 547.
[5] 刘小萍. 增强型复合碳纤维材料的弹性常数矩阵及超声传播特性[J]. Journal tsinghua university, 1992, 32 (3): 53- 59.
[6] 奥尔特 B A. 固体中的声场和波[M]. 北京: 科学出版社. 1982.
[7] 张海潮. 圆形厚度模换能器在固体介质中辐射的直达波和边缘波[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 1984. 10- 11.
[8] 陈以方,张家骏. 超声检测工件弹性模量的研究[J]. 无损检测, 1997, 19(9): 241- 24.
[9] 许士良. C 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2005-04-29; 修订日期: 2005-08-28
作者简介: 陆铭慧(1963-),女,博士,主要从事材料机械性能评价、复杂介质中声场和超声成像研究,联系地址: 清华大学机械工程系(100084)。

(上接第 42 页)

testing of composite materials [R]. Greenbelt, MD, USA: NASA, N20010020209.
[2] NASA Marshall Space Flight Center. Composite liquid oxygen tank tests successful[EB/OL]. <http://std.msfc.nasa.gov/news/02tank.html>, 2001.
[3] NASA-NHB 8060.1 Flammability, odor, and offgassing requirements and test procedures for materials in environments that support combustion[S].
[4] ASTM D-2512-95. Standard test method for compatibility of materials with liquid oxygen (impact sensitivity threshold and pass-fail techniques)[S].
[5] ASTM F371-83. Standard test for compatibility of materials with liquid oxygen (reaction intensity method) [S].
[6] U S Air Force Specification Bulletin 527. Liquid oxygen compatibility impact sensitivity test method[S].
[7] 欧育湘,陈宇,王筱梅. 阻燃高分子材料[M]. 北京: 国防工业出

版社, 2001. 35- 43.
[8] 孙曼灵. 环氧树脂应用原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 111- 242.
[9] KIRN E P, GRAF N A, ELY K W. Cyanate ester composites for oxygen containment[P]. US Patent 6,334,589. 2002- 1- 1.
[10] MILL T, CHAMBERLAIN D L, STRINGHAM R, et al. Investigation of reactivity of launch vehicle materials with liquid oxygen[R]. Greenbelt, MD, USA: NASA, N67- 37416.
[11] 钟世云,许乾慰,王公善. 聚合物降解与稳定化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 24- 29.

基金项目: 国家高技术“863-702”项目(2002AA724040)
收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-04-19
作者简介: 王戈(1972-),女,工程师,在读博士,目前主要从事聚合物及其复合材料领域的研究,联系地址: 湖南长沙国防科技大学一院重点实验室(410073)。